

基于晶闸管开关的高重频脉冲泄放研究

江凤娟 罗红城 顾金良 夏 言

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室 南京 210094)

摘 要:高重频脉冲功率源是脉冲功率源技术未来发展的方向,脉冲电容器放电结束后依旧会残留大量电能,出于安全考虑,需要进行残能泄放。为了实现脉冲功率源的高重频放电技术,必须对脉冲电容器上的残能进行快速泄放。传统的机械开关导通响应时间长,开通时间不一致,不利于多模块脉冲功率源残能的快速泄放,因而采用快速晶闸管替代传统的机械泄放开关。通过计算分析给出了在实际实验中泄放电阻参数选择;设计了一种新型实现晶闸管开关状态监测功能的硬件电路,弥补了软件检测有时间延迟的缺点。结合实际应用给出了监测电路的设计原理与器件参数。测试结果表明,此方案可行,在0.5 s内电容器可以完成残能泄放,为高重频技术的实现奠定了基础。

关键词:高重频;泄放电阻;阻值计算;晶闸管;状态监测

中图分类号: TN345⁺.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Study on the discharge technology of high repetition pulse power supply based on thyristor switch

Jiang Fengjuan Luo Hong'e Gu Jinliang Xia Yan

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: High repetition frequency pulse power source is the future development direction of pulsed power source technology. After discharge of pulse capacitor, there will remain a large amount of electrical energy. Residual energy need to discharge for security reason. In order to realize the pulse power source high repetition frequency discharge technology, residual capacity on the pulse capacitor must be released carry on the rapid. The traditional mechanical switch conduction time is long, opening time is inconsistent. It is not conducive to multi-module pulse power source of the rapid discharge of residual power, so this article uses fast thyristor to replace the traditional mechanical vent switch. The selection of the discharge resistance parameters in practical experiments is given by calculation and analysis. A new hardware circuit for realizing thyristor switch state monitoring function is designed, which compensates the shortcomings of time delay of software detection. The schematic diagram and device parameters of the monitoring circuit are given in combination with practical application. The test results show that this scheme is feasible, Residual energy of the capacitor can be discharged within 0.5 s, which lays the foundation for the realization of high repetition frequency technology.

Keywords: high repetition frequency; discharge resistance; resistance calculation; thyristor; status monitoring

0 引 言

以高电压、高功率、大电流、强脉冲为主要特点的脉冲功率技术,在军事领域进行深入的研究和应用^[1-2]。军事领域中脉冲功率技术主要应用于电磁炮,该新概念武器要求在很短的时间内获得足够的脉冲能量(数十兆焦)^[3-4],而获得这样的脉冲能量的重要途径之一即是以电容储能为基础的高功率脉冲电源^[5-7]。未来电磁轨道发射技术的发展,需要电磁轨道炮具备快速连续发射弹丸的能力,这就需要脉冲功率源具备相应的快速连续多次充放电能力,

即脉冲电源的高重频的工作能力。目前有多种快速充电装置,技术已较为成熟,可以满足高重频的要求。脉冲电容器放电结束后,电容器会残留2 000 V左右的电压,为了保证电容器的重新投运和操作人员的人身安全,需要将残留电压进行快速泄放到允许残留电压标准值。电容器的泄放电路主要以泄放电阻作为泄放器件,电阻质量不好或是参数选择不对会导致放电效率下降甚至导致放电失败,电容器损坏等重大问题^[8],因此泄放电阻的正确选择显得尤为重要。传统的泄放开关选用220 V交流继电器,但是由于多模块同时工作时,继电器的开关会有延迟,导

致控制系统检测开关状态时间大大延长,阻碍了高重频技术的实现。大功率可控硅半导体器件具有寿命长、高可靠性、开关速度快等优点,因而在高功率脉冲技术领域得到广泛应用。泄放开关的关断速度和电阻参数的选择,是使电容器能量释放过程实现快速放电的关键。

本文通过计算,确定满足要求的最优电阻参数,并且通过实验检测在高压放电的条件下,电阻温度特性曲线,通过实验数据可以计算出电阻的温度系数。并且设计一种检测晶闸管开关状态的硬件电路。

1 控制系统设计

脉冲功率源原理如图1所示,充电机对超级电容器充电,当充到设定电压后,停止充电,总控制器会通过CAN总线控制子控制单元发出触发信号,使 Q_2 导通,实现超级电容器快速释放电能。电容器放电结束后,为了消除电容器中残留电压的安全隐患,需要及时触发 Q_1 ,通过大功率电阻 R_1 将残留电压快速泄放。本系统将传统的继电器泄放开关换成晶闸管,加快开关动作。

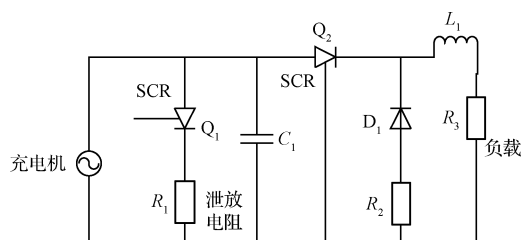


图1 脉冲功率源原理

2 泄放电阻

在高重频工作条件下,高电压、大电流会对泄放电阻造成一定的损坏,会存在放电电阻先于电容器前失效,这种现象存在严重的安全隐患。但是这种事件发生的机率是可以减小的。因此对电容器和泄放电阻的可靠性测试是很有必要的,并且泄放电阻的可靠性要求要远高于电容器可靠性的要求。

晶闸管出发后,电容器与泄放电阻形成回路,开始泄放残留电压。为了能够快速泄放电容器中的残留电能,需要正确的选择电阻参数。本系统中选用了 $1\,000\,\mu\text{F}$ 电容器,电容器有 $2\,000\,\text{V}$ 左右的残留电压。为了满足高重频的要求,在满足电路正常工作条件下电容器的残压泄放时间要尽可能的短。一般采用减小泄放电阻阻值的方法加快放电速度,但是随着电阻阻值的减小,泄放电流随之增大,要保证泄放电流在泄放开关可承受的范围,并且不能超过电阻的额定功率。

泄放电阻的选用一般应注意:1) 电阻击穿电压/使用电压 $\geq 8^{[9]}$;2) 电容器放电过程中,电阻会耗能发热,电阻值也会随之变化,影响放电时间,因此要选择温升较低的电阻;3) 考虑到温度和电压因素的影响,电阻的实际使用

功率会远小于额定功率,因而选用实际使用功率为两倍的额定功率的泄放电阻^[10-11]。

泄放开关关闭后,电容器电压 V_C 由 V_s 开始下降,其变化的规律为:

$$V_C(t) = V_s e^{-t/RC} \quad (1)$$

式中: V_C 为泄放结束后,允许的残余电压; V_s 为电容器最初的残余电压; R 为泄放电阻; t 为从 V_C 放电至 V_s 的时间。由式(1)可以得到电容器的放电电阻的计算公式:

$$R = \frac{t}{C \ln\left(\frac{U_s}{U_c}\right)} \quad (2)$$

电容放电时释放的能量为:

$$W = \frac{1}{2} C V_s^2 \quad (3)$$

式中: W 为电容器放电释放的能量; C 为电容器的电容值。

为了测试泄放时间,将 $1\,000\,\mu\text{F}$ 的电容器冲到电压 $500\,\text{V}$ 和 $1\,\text{kV}$,对单个 $50\,\text{kJ}$ 脉冲电源模块进行泄放实验,得到如下波形,0.3 s泄放结束,电压基本泄放到 $0\,\text{V}$,泄放电阻为 $30\,\Omega$ 。假设允许残能电压 $10\,\text{V}$,在 $0.3\,\text{s}$ 内泄放结束,带入公式(2)计算出

$$R = \frac{0.3}{1\,000 \cdot 10^{-6} \cdot \ln\left(\frac{1000}{10}\right)} = 77\,\Omega \quad (4)$$

实际情况中,根据允许残能剩余电压选择泄放电阻。 $500\,\text{V}$ 放电实验电压曲线如图2所示。 $1\,\text{kV}$ 放电实验电压曲线如图3所示。 $500\,\text{V}$ 放电实验电流曲线如图4所示。 $1\,\text{kV}$ 放电实验电流曲线如图5所示。

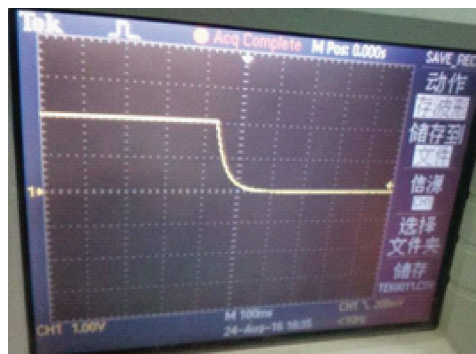


图2 500 V 放电实验电压曲线

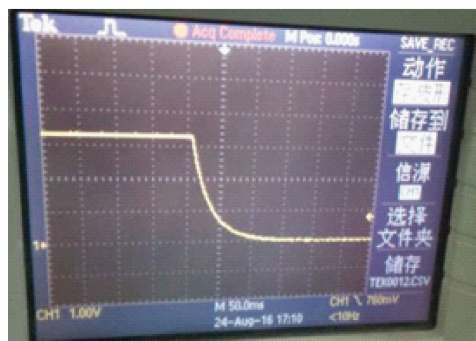


图3 1 kV 放电实验电压曲线

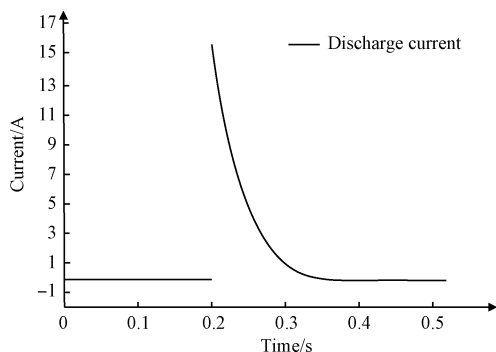


图4 500 V 放电实验电流曲线

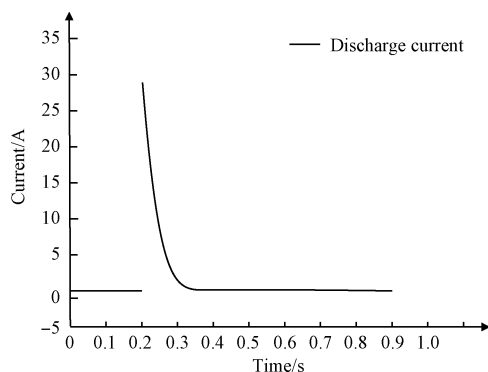


图5 1 kV 放电实验电流曲线

3 泄放开关的监测

由于晶闸管具有关断速度快、寿命长、耐高压、噪声小等优点,本系统采用晶闸管替代原始的机械开关,解决机械开关时间延迟问题。快速晶闸管的结构和工作原理与普通晶闸管相同,但是它的开通为 $4\sim 8\ \mu\text{s}$,关断时间为 $10\sim 60\ \mu\text{s}$,比普通晶闸管的开通、关段时间短,可在高频率条件下工作,因此为了实现快速关断,本系统使用快速晶闸管作为泄放开关。

若晶闸管装置发出触发信号后,晶闸管没有正常触发,则电容器残能无法泄放,产生安全问题。若晶闸管正确导通,则其门极触发电压便会失去作用,此时如果继续给门极施加驱动信号,会增加晶闸管门极功率损耗,降低晶闸管工作效率^[12]。若在电容器残余电能泄放阶段后晶闸管没有正常关断,则脉冲功率系统再次充电时,很容易使设备损坏或发生事故。因此需要正确判断出晶闸管的工作状态,及时撤去门极触发信号和判断实验流程,提高晶闸管使用寿命和系统可靠性、安全性。为此本文设计了晶闸管开关状态监测电路,判断晶闸管的开通与关断,为高重频系统的实现奠定基础。

3.1 晶闸管状态检测原理

经实验证明,晶闸管的关断电流要低于 $200\ \text{mA}$,因此可通过采集晶闸管电流是否过零来判断其是否关断^[13]。

目前通常采用检测开关的输出电流是否过零来判断

其是否关断,主要有软件过零检测和硬件过零检测两种方法。软件过零检测是预先设置一个比较值,然后将检测到的电流值与其进行比较,若小于预设值则认为过零,由于环境的干扰和采集元件精度的局限性,极易出现错误判断。硬件过零检测是通过霍尔电流传感器检测开关电流,在正常状态下可以正确判断开关状态,但是当电源出现异常时,该检测方法就会失效^[14-15]。

本文设计了一种完全由硬件电路搭建的简单电路,响应速率快,功能齐全,能灵活运用新型检测电路。

3.2 晶闸管状态检测设计

晶闸管状态检测电路原理如图6所示。选用高精度的闭环霍尔电流传感器测量泄放回路电流。霍尔传感器通过测量出磁场,从而确定导线中电流的大小,其不会与被测电路发生电接触,不会影响被测电路。在电容器残能泄放过程中,泄放回路的泄放电流不断减小,当小到一定值时,晶闸管关断,泄放结束,可以进行下一次充电。霍尔电流传感器测得电流信号后,通过测量电阻将电流信号转换为电压信号,供后续使用。

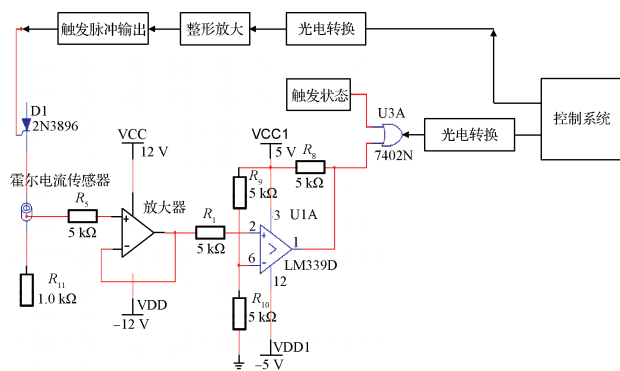


图6 晶闸管状态检测电路

判断晶闸管状态,首先要保证晶闸管开通,当泄放回路中有电流信号时,说明晶闸管正确触发,输出触发状态为0。本文选用的霍尔电流传感器的输出电压 $1.5\sim 3.5\ \text{V}$,理想状态下,当被测电流为 $50\ \text{mA}$ 时,输出为 $2.5\ \text{V}$ 。采集到电流信号后,电流传感器输出端加一级射极跟随器,输出电压信号,后又接入一级比较器,基准电压为 $2.5\ \text{V}$ 。当泄放电流小于 $50\ \text{mA}$ 时,输出信号为0,即晶闸管关断,否则输出为1。将检测电路输出与晶闸管触发状态输出进行或非运算,输出为1时,可以判定泄放结束,晶闸管已正常关断。

对以上电路进行仿真验证,用虚拟信号发生器给出一定高频率幅度为 $5\ \text{V}$ 的正弦波信号,代替霍尔传感器给出的 $1.5\sim 3.5\ \text{V}$ 的电压信号,经过电压跟随、比较器电路后,得到的信号如图7所示,输出电压跟随性很好,电压比较器可以正确的输出比较结果。证明该电路可以对电流信号进行较准确的采集,完成了对电流大小的检测和比较,可以实现晶闸管状态的监测。

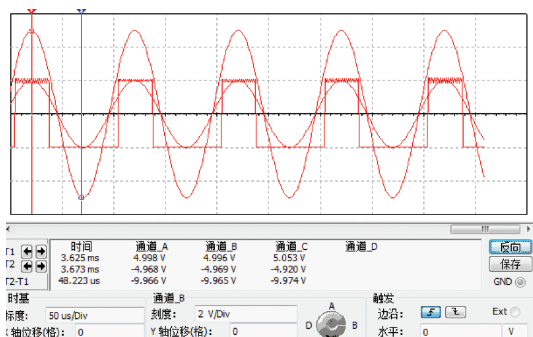


图7 电流检测电路仿真

4 结论

为了实现脉冲功率系统的残能快速泄放,本文根据实际的实验参数计算分析出满足快速泄放的泄放电阻的阻值大小。本系统将传统的机械泄放开关改为快速晶闸管,为了检测到残能泄放开关的状态,本文设计了一种完全由硬件电阻搭建的检测系统。通过霍尔传感器检测通过晶闸管的电流,经过电压跟随器稳压后,经过基准电压为2.5 V的比较器,比较器输出低电平时表示晶闸管已关断,并将该状态与检测到的晶闸管的触发状态相与,保证晶闸管是在正常触发的条件下,正确判断残能泄放结束并可以进行下次充电。晶闸管状态监测系统尚在开发中,还没有实际应用,为了验证系统的可行性,本文通过 Multisim 仿真监测结果,仿真结果表明该系统理论上是可以实现实际想要的功能,可以投入实际试验中。

参考文献

- [1] 王莹. 脉冲功率技术综述[J]. 电气技术, 2009(4): 5-9.
- [2] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用:(2)电路学方法与电磁学原理[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(2): 253-260.
- [3] 高虹霓, 赵一兵, 刘力, 等. 新概念武器及主要关键技术综述[J]. 飞航导弹, 2013(8): 32-38.

- [4] 高岚. 高重复频率的快脉冲功率源研究[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [5] 刘大同, 周建宝, 郭力萌, 等. 锂离子电池健康评估和寿命预测综述[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 1-16.
- [6] 张超, 董健年, 张军. 脉冲功率源用高耦合度储能电感研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10): 21-25.
- [7] 敖振浪, 刘艳中, 敖进华. 自动气象站多功能电源的设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(2): 18-22, 33.
- [8] 熊亮. 高压电容器内部放电电阻的测量方法探讨[J]. 广西电力, 2016, 39(4): 29-30, 35.
- [9] 孙翠平, 李晓军. 高压电容器内放电电阻的设计与应用思考[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 34-37.
- [10] 马铁军, 傅煜. 阻容吸收回路放点电阻过热原因分析与处理[J]. 中国电力, 2010, 43(11): 92-95.
- [11] 张凤蕊, 谷俊婷. 并联电容器放电能量和放电电阻的估算[J]. 煤炭技术, 2010, 29(9): 37-46.
- [12] 郭帆, 何小平, 王海洋, 等. 晶闸管触发开通特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2483-2487.
- [13] 黄垂兵, 潘启军, 马名中, 等. 大功率晶闸管开关驱动电路状态监测设计[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(12): 126-129.
- [14] 张普红, 霍健. 光电触发并联晶闸管回路检测电路[C]. 全国冶金自动化信息网 2011 年年会论文集, 2011-04, 中国安徽合肥:《冶金自动化》杂志社, 2011: 267-271.
- [15] 杨晓静, 张立材. 一种晶闸管自然关断点检测判断方法[J]. 现代电子技术, 2012, 35(10): 163-165, 168.

作者简介

江凤娟, 硕士研究生, 主要研究方向为仪器与测试技术。

E-mail: 1165511036@qq.com